



护底软体排破坏机理及应对措施

付中敏^{1,2}

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430011)

摘要: 软体排边缘床面易受不利水流冲刷下切, 当冲刷下切强度超过排体变形能力时, 软体排排边会出现变形破坏。分析了护底软体排变形破坏的主要影响因素: 水流条件、河床组成、软体排自身结构、余排宽度及施工工艺等。探讨了护底软体排破坏的力学机理。提出在排边一定范围内抛投一定密度的扭双工字型透水框架, 能削减排边近底层的流速及紊动强度进而减弱或抑制排边冲刷, 从而维持软体排结构安全及坝体稳定的应对措施。

关键词: 软体排; 航道整治; 力学机理; 护底

中图分类号: U 617.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)07-0114-05

Failure mechanism of soft mattress in channel regulation project and counter measures

FU Zhong-min^{1,2}

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Changjiang Waterway Institute of Planning, Design & Research, Wuhan 430011, China)

Abstract: The bed in the edge of soft mattress is easy to be scoured by unfavorable flow. When the scouring depth exceeds the deformation capacity of soft mattress, the edge of it sometimes appears deformation failure. The paper analyzes the influential factors of the deformation failure of soft mattress, which includes the flow conditions, bed composition, as well as the structure and width of soft mattress. The failure mechanism of soft mattress is also studied and corresponding counter measures are proposed. It indicates that a permeable frame of certain density can reduce the turbulent intensity near the bottom boundary flow and the bed scouring in the edge of soft mattress, which can maintain the safety of soft mattress and spur dike.

Keywords: soft mattress; channel regulation; mechanical mechanism; bottom protection

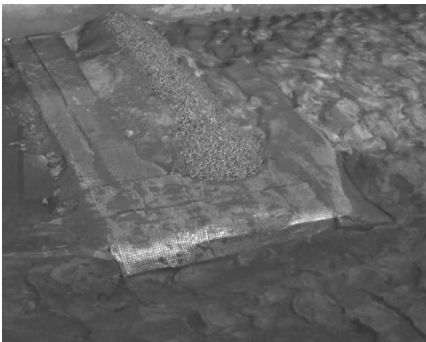
软体排利用其隔离和反滤功能进行河床的护底和固滩, 能防止水流直接冲刷河床、避免因水流渗透作用而造成河床的局部变形破坏^[1]。由于洪水期水流流速较大, 护底软体排守护滩面后, 排边未护滩面受大流速及建筑物附近不利流态的水体作用而冲刷下切, 柔性软体排排边随冲刷坑的发展而逐渐塌陷以贴覆冲坑, 冲刷坑也逐渐向排内发展, 当排边冲刷发展到一定程度, 且冲刷下切强度超过软体排的变形能力时, 因软体排压载体本身为刚性构件, 使得软体排排边部分出现

“悬挂”现象(图1), 悬挂于冲刷坑内的软体排对排垫拉力大幅加大, 易造成排体撕裂破坏。航道整治工程中的护底软体排易发生破坏时, 将严重影响整治工程的效果, 故许多学者从软体排施工工艺和稳定性方面开展了相关研究, 取得了较好的效果^[2-3]。文献[4]针对混凝土联锁块和软体排施工工艺的特点, 分析软体排在沉排过程中的排体收缩原因, 提出利用混凝土构件控制软体排收缩的方法。沉排对比试验结果表明, 放置混凝土构件的软体排具有良好的排体收缩控制功能。

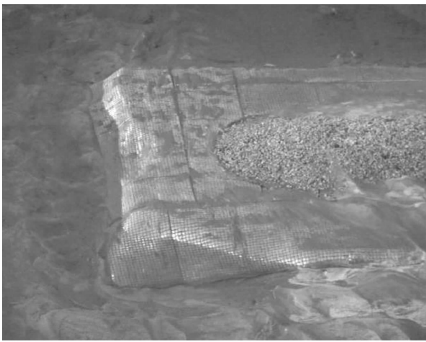
收稿日期: 2014-11-30

作者简介: 付中敏(1977—), 男, 高级工程师, 从事航道科研与设计工作。

文献 [5-8] 分析了软体排受力与计算模型，研究了软体排的施工工艺。相对而言，护底软体排的排破坏机理研究较少，故本文从理论上分析软体排的排破坏机理并提出针对措施。



a) 排边塌陷



b) 悬挂变形

图 1 护底软体排变形破坏

1 护底软体排变形破坏的主要影响因素

护底软体排变形破坏的影响因素较多，破坏的关键在于软体排附近局部冲刷坑的形成与发展。就软体排而言，其破坏的主要因素包括水流条件、河床组成、软体排自身的结构及余排宽度、软体排施工工艺等。

1) 水流条件。

水流条件是造成护底软体排破坏的动力因素，也是根本原因。主要包括流速大小、作用时间长、水体紊动强度、水深以及不利流态（如绕堤流、越堤流、沿堤流）等。

水流行进至软体排边缘时，当流速大于床面泥沙起动流速时，软体排边缘泥沙起动，未护滩面逐渐下切，随着水流作用时间的加长，软体排边缘未护滩面大幅下切，形成局部冲刷坑，促使软体排的变形破坏。

2) 河床组成。

泥沙粒径的大小决定了河床的可动性。河床的组成与水流条件的共同作用使得软体排边缘局部冲刷坑的形成。

3) 软体排自身结构及排体宽度。

压载体重力是块体能否有效压载排体以防止排体侧掀破坏的重要因素，同时也是软体排在“悬挂”时加速排体破坏的重要因素；系结方式、排体接缝的连接方式、编织布及联接绳抗拉强度都是限制软体排自身抵抗破坏强度的重要因素。

护底软体排排边冲刷坑的深度与排体宽度直接相关，排体宽度较小时，受丁坝、导堤等整治建筑物的影响增强，局部冲刷加大、冲坑坡度变陡，不利于软体排的安全；而当排体宽度较大时，排边冲刷主要受软体排自身的影响，由于排体对水流的扰动较小，因而产生的局部冲刷也较小，利于软体排的安全。

4) 施工工艺。

排体搭接宽度较小时，当冲刷坑发展至两块以上排体受护区域时，搭接处河床易出露，使得冲刷向软体排内部发展；受加工工艺限制，排垫多采用纵向加筋，而横向未加筋，使得排体柔性不足以适应河床较大幅度变形，排体“悬挂”后，排体上的拉力大于抗拉强度时发生撕裂。

综合上述因素可知，流速大小及建筑物附近的不利流态是软体排破坏的动力因素，滩面泥沙粒径与较大流速及不利流态共同作用后，局部冲刷坑的形成是软体排破坏的诱发原因，排垫、联接绳以及接缝部位的抗拉强度不够是软体排破坏的直接原因。

2 护底软体排破坏的力学机理

从软体排单个压载体及软体排受力角度对破坏机理进行分析，位于冲刷坑内的软体排边缘压载体受力情况见图 2。压载体在冲刷坑内的受力主要有：有效重力 W' 、拖曳力 F_D 、上举力 F_L 、动水压力 P 、排垫阻碍块体运动的拉力 F_1 和 F_2 、滩面对块体的摩擦力 f_1 和 f_2 、滩体对压载体的支持力 F_N 。

上举力:

$$F_L = C_L \alpha_2 d^2 \rho_w g \cdot \frac{u^2}{2g} \quad (1)$$

拖曳力:

$$F_D = C_D \alpha_3 d^2 \rho_w g \cdot \frac{u^2}{2g} \quad (2)$$

有效重力:

$$W' = \alpha_1 (\rho_m g - \rho_w g) d^3 \quad (3)$$

式中: a_1 为软体排单个压载体的体积系数; a_2 、 a_3 分别为垂直于水流方向以及铅直方向的沙粒面积系数; C_L 、 C_D 为绕流系数, 可采用试验资料进行率定; ρ_w 为水的密度; ρ_m 为排体的密度; u 为流速; d 为排体的厚度。

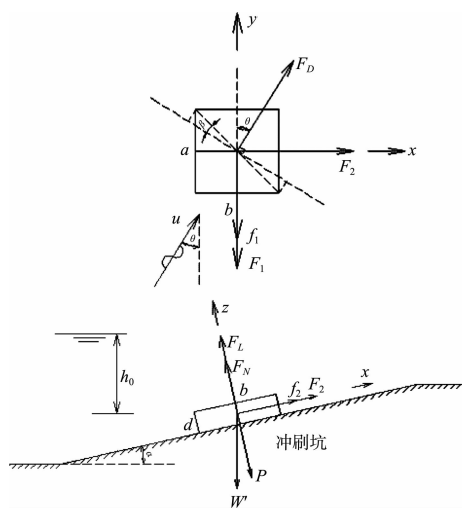


图2 软体排边缘块体受力分析

动水压力 P 。流动水流对块体的时均压力和脉动压力之和为动水压力, 脉动压力主要与水流流速、水深有关, 流速越大、水深越小则脉动压力越大。

排垫阻碍块体运动的拉力。 F_1 、 F_2 分别为联接绳、加筋条、排垫阻碍块体分别沿块体长度(纵向)、宽度(横向)方向运动的拉力, 与联接绳、加筋条、排垫本身抗拉强度有关, 当超过其抗拉强度时, 联接绳、加筋条、排垫可能出现紧绷或撕断, 使得排垫或滩面暴露于水面, 守护效果减弱。

沿冲刷坑坡度方向为平面方向, 垂直于冲刷坑坡度方向为 z 方向。

X 方向:

$$F_D \sin \theta + F_2 + f_2 - W' \sin \alpha = 0 \quad (4)$$

Y 方向:

$$F_D \cos \theta - F_1 - f_1 = 0 \quad (5)$$

Z 方向:

$$F_N + F_L - P - W' \cos \alpha = 0 \quad (6)$$

将式(1)~(3)代入式(4)~(6)得:

$$F_2 = (\rho_m - \rho_w) g \alpha_1 d^3 \sin \alpha - C_D \alpha_3 d^2 \rho_w g \sin \theta \cdot \frac{u^2}{2} - f_2 \quad (7)$$

$$F_1 = C_D \alpha_3 d^2 \rho_w g \cos \theta \cdot \frac{u^2}{2} - f_1 \quad (8)$$

$$F_N = P + (\rho_m g - \rho_w g) \alpha_1 d^3 \cos \alpha - C_L \alpha_2 d^2 \rho_w g \cdot \frac{u^2}{2} \quad (9)$$

式中: α 为软体排的倾角; θ 为拖曳力 F_D 与垂向的角度; 其他参数与式(1)~(3)相同。由式(7)~(9)可知, 软体排块体受力主要与块体的材料和尺寸、水流特性、冲刷坑形态及组成泥沙特性等有关。就单个块体而言, 软体排破坏与否主要与 F_N 大小是否大于块体自身强度及 F_1 、 F_2 大小是否大于联接绳、加筋条、排垫抗拉强度有关。由于块体本身强度较大, 一般不易受水流作用而破坏, 块体附近软体排主要破坏形式为联接绳、加筋条、排垫受力大于其抗拉强度而遭受破坏, 使得联接绳断裂、块体脱离排垫或排垫撕毁。

在软体排边缘由于水流淘刷, 逐渐形成冲刷坑, 坡度逐渐变陡, 此时, 由于软体排具有一定柔性, 软体排逐渐下降贴合受冲床面, 边缘块体也贴合床面, 软体排仍保护受冲床面, 由于 a 值较大, 使得联接绳、排垫受到的拉力 F_2 也较大, 此时, 联接绳可能出现紧绷或撕断, 块体移动或脱落, 护底效果减弱。

随着软体排边缘冲刷坑的发展, 到一定的冲刷坑深度时, 受软体排整体柔性限制, 边缘排垫出现“悬挂”等变形现象(图3)。

冲刷坑内软体排边缘出现“悬挂”变形时, 单宽“悬挂”排垫最大受力为 T , 受力点位于排垫悬挂附近的床面接触面处(图3), T 可表示为:

$$T = C \int_0^L q(x) dx \quad (10)$$

式中： C 为与软体排柔软率有关的系数； L 为排体悬挂长度； $q(x)$ 为单宽“悬挂”软体排上受力（有效重力及动水压力之和）分布。

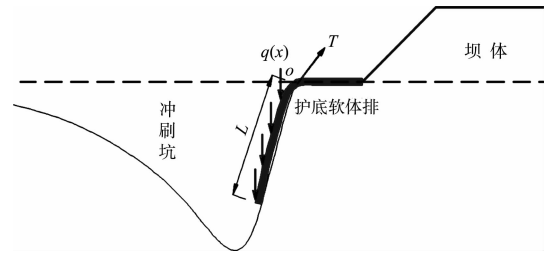


图 3 冲刷坑内软体排边缘“悬挂”受力

随着冲刷坑加深、坡度变陡，“悬挂”排体长度变长、 q 加大，当 q 加大至一定程度或冲刷坑紊动强烈、“悬挂”软体排上脉动压力瞬时增大时， T 大于排垫极限抗拉强度，该处排垫撕裂、联接绳断裂、块体脱落，使得床面暴露，并直接受水流冲刷，冲刷坑向软体排内部发展，软体排破坏也向护底内部发展。

从软体排破坏受力分析来看，护底软体排破坏的主要机理为：护底软体排铺设后排体附近床面冲淤平衡遭到破坏，加之建筑物附近不利流态的影响，加剧排体边缘局部冲刷的形成与发展，冲坑内水体紊动增强，压载体之间的脉动力迅速增加，由于排体具有一定的柔性，跟随排边冲刷而下降，当冲坑坡度较陡时，联接绳可能出现紧绷或撕断，压载体移动或脱落，压载效果减弱；随着冲刷坑的继续发展，受软体排整体柔性限制，排边出现“悬挂”等变形，至冲刷坑发展到一定阶段，变形的软体排上的受力（有效重力及动水压力之和）达到一定大小或排体脉动压力瞬时增大时，软体排变形一侧的排垫受力大于其极限抗拉强度，排垫撕裂，联接绳断裂、压载体脱落，软体排破坏，撕裂处床面失去保护，直接受水流冲刷，冲刷坑向软体排内部发展。

3 护底软体排变形破坏应对措施

护底软体排破坏的诱发原因是排体边缘冲刷坑的形成，而局部冲刷坑的形成又与建筑物附近水流流速加大、紊动强度增强相关，因而，减小

软体排排边水流流速和紊动强度、抑制排边冲刷的形成或发展有利于防止排体的破坏。目前工程中采用的防护措施是投放四面六边形透水框架、扭王字块、石块等。其中，四面六边形透水框架群治河技术的基本原理是利用框架群多个杆件的滞流减速作用，具有良好的消能效果，但该结构属封闭式，在水流作用下容易滚动，且杆件通过焊接连成一体，节点暴露在水体中，易被水锈蚀，在水流的长期作用下框架会发生破坏，减小消能效果；扭王字块主要广泛应用于海区；石块则是非透水结构，效能效率较低。因此，文献 [9] 提出了一种新型消能护滩结构——扭双工字型透水框架（图 4）。针对新型透水框架具有良好的消能护滩效果，将该透水框架应用于丁坝护底软体排的边缘防护，并开展了清水冲刷对比试验。对比试验中，坝体尺度（坝高 6 m、向河坡 1:5、边坡 1:2）、水流条件（水深 10 m、流速 2.5 m/s）、丁坝外侧护底范围（33 m）相同，但护底结构形式不同，一种为单纯软体排护底，排体宽度 33 m，另一种软体排宽度 21 m，外缘抛投宽度 12 m 的透水框架群。在此基础上清水冲刷至床面基本冲淤平衡为止。

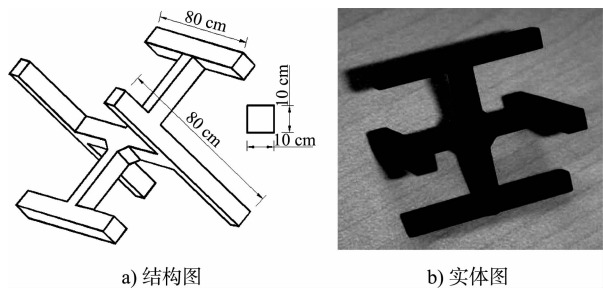


图 4 扭双工字型透水框架

图 5 为两种防护形式下，丁坝坝轴线床面冲刷变化，可以看出，相同的护底范围，受坝头绕堤流影响，护底建筑物边缘均形成了局部冲刷坑，但软体排外侧抛投透水框架的冲坑相对较小，且冲坑距丁坝距离也较远，即同等护底范围条件下，护底外缘抛投透水框架可起到排边防冲，且有利于减缓局部冲刷，从而利于软体排结构安全及坝体稳定。

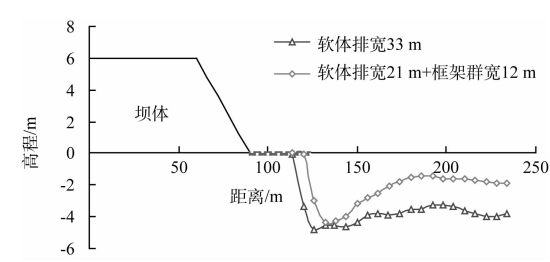
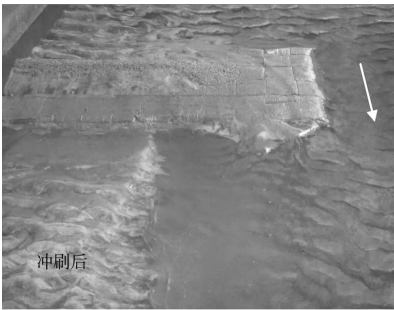


图5 不同防护形式下丁坝轴线床面冲刷比较

建筑物附近冲刷变化见图6，可以看出，抛投透水框架后坝头前沿因绕堤流引起的局部冲刷得到减缓，但坝头下游侧及坝身下游越堤流引起的局部冲刷并未减缓，范围冲刷有所加剧，分析原因如下：越堤流作用下床面受到下沉流淘刷影响，即近底层流速具有垂直向下的分量（图3），由于透水框架垂向上仅抛投两层，垂向消能减速效果并不明显，因而床面仍受到淘刷，框架群随床面冲刷而下降，淘刷幅度较未护底床面缓和得多。



d) 软体排宽度33 m冲刷后

图6 新型透水框架群抛投软体排外缘后床面冲刷变化

结合试验结果，可在软体排边缘抛投一定范围、一定密度的透水框架以减缓或抑制软体排边缘的局部冲刷，进而维持软体排结构安全及坝体稳定，但透水框架的抛投密度与建筑物附近的水流流态有关，对于以平面变化为主的绕堤流、沿堤流可以 $2\text{ 个}/\text{m}^2$ 的密度进行抛投，而对于以垂向变化为主的越堤流，透水框架的抛投密度需增加，具体数值可根据试验确定。

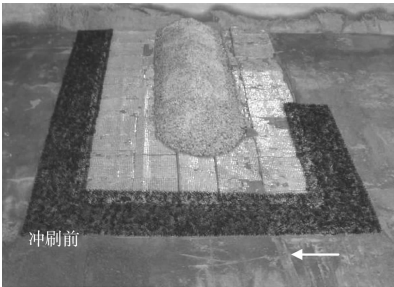
4 结论

1) 影响护底软体排变形破坏的主要因素包括水流条件、河床组成、软体排自身结构、余排宽度及施工工艺等。

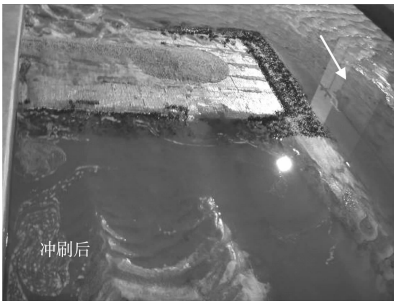
2) 护底软体排破坏的力学机理为：排体边缘发生局部冲刷后，排体随排边冲刷而下降，联接绳可能出现紧绷或撕断，压载体移动或脱落，压载效果减弱；随着冲刷坑的继续发展，排边出现“悬挂”等变形，当变形的软体排上受力达到一定大小时，软体排变形一侧的排垫出现撕裂，联接绳断裂、压载体脱落等破坏，撕裂处床面失去保护，直接接受水流冲刷，冲刷坑进一步向软体排内部发展。

3) 试验研究表明，扭双工字型透水框架具有较好的软体排破坏防护效果。可在排边一定范围内抛投一定密度的扭双工字型透水框架，削减排边近底层的流速及紊动强度进而减弱或抑制排边冲刷，从而维持软体排结构安全及坝体稳定。透水框架的抛投密度与建筑物附近的水流流态有关，对于以平面变化为主的绕堤流、沿堤流可以 $2\text{ 个}/\text{m}^2$ 的密度进行抛投，而对于以垂向变化为主的越堤流，透水框架的抛投密度需增加。

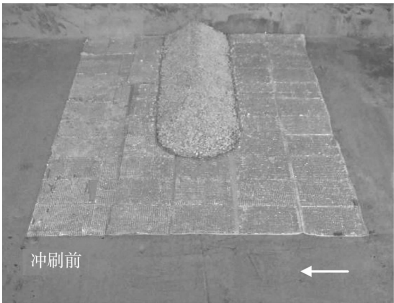
(下转第128页)



a) 软体排宽度21 m冲刷前



b) 软体排宽度21 m冲刷后



c) 软体排宽度33 m冲刷前